

На правах рукописи

**Двойников Дмитрий Алексеевич**

**РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ  
ОГРАНИЧЕНИЙ В ОБЪЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в ФГБУН Институте машиноведения УрО РАН и  
ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научные руководители:

доктор технических наук  
Заслуженный деятель науки РФ  
Мазунин Василий Павлович

доктор технических наук, с.н.с.  
Зюзев Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты:

Усынин Юрий Семёнович, доктор  
технических наук, профессор, ФГБОУ  
ВПО Южно-Уральский государствен-  
ный университет, г. Челябинск, про-  
фессор кафедры «Электропривод и  
автоматизация промышленных уста-  
новок»

Зеленцов Валерий Иванович, кандидат  
технических наук, доцент, ООО ПФ  
«Тяжпромэлектропривод», г. Екате-  
ринбург, директор

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО "Магнитогорский госу-  
дарственный технический университет  
им. Г.И. Носова"

Защита состоится 26 июня 2013 г. в 14 часов 15 минут на заседании дис-  
сертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский феде-  
ральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э-217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского федераль-  
ного университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Автореферат разослан 24 мая 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.285.03

Зюзев А. М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Исследования и разработка систем управления и регулирования электроприводов, оптимизированных по быстродействию, расширяются в связи с повышением требований к качеству переходных процессов, совершенствованием технических средств и методов управления. При решении задачи оптимизации необходимо учитывать свойства источников питания, двигателей и механизмов, выявлять закономерности управления при параметрических (инерционность) и физических ограничениях, характеризующих пределы возможных значений координат перемещения, скорости, нагрузки, ускорения и его производных.

Результаты разработок быстродействующих систем управления наиболее востребованы при создании регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока с интенсивными режимами работы, применяемых в различных отраслях, в том числе в металлургии для механизмов прокатных станов и установок механических испытаний металлов. В электроприводы входят системы управления и регулирования, совместно с механизмами технологических агрегатов они представляют собой электромеханические системы (ЭМС), входящие в состав автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ-ТП) на нижнем уровне автоматизации, когда требуются высокая надёжность, многократное воспроизведение разнообразных процессов при относительно простых функциях задания, изменяющегося в широком диапазоне.

Современный уровень развития ЭМС представлен в основном многоконтурными «системами подчинённого регулирования». Они создаются в рамках теории автоматического регулирования при неполном описании объектов с известным приближением и использованием квадратичных критериев оптимальности переходных функций, в том числе по быстродействию. Однако при управлении объектом с ограничениями для таких систем доступным является лишь воспроизведение специально формируемых задающих воздействий, из-за чего снижается быстродействие.

В существующих ЭМС не получили широкого внедрения достижения математической теории оптимального управления. Несмотря на многочисленные исследования, опытно-промышленная реализация устройств, использующих в алгоритмах управления методы поиска границ пространства состояний в масштабе реального времени, оказалась не систематизированной из-за огромного количества вариантов и математической неопределённости. Не исследовано сопряжение интервалов управления и регулирования.

Наиболее близким к теме диссертации является прикладное направление развития теории оптимального управления, предложенное акад. Красовским А.А. и др. («физическая теория управления»), ориентированное на комплексное использование математических методов оптимального управления и авторегулирования. Оно нацелено на создание широко тиражируемых систем с реально контролируемыми координатами и учетом свойств объектов, в которых переходные процессы максимально приближены к оптимальным. Одним из этапов развития физической теории управления, используемой при создании

регулируемых быстродействующих многоконтурных ЭМС, являются выводы и разработки д.т.н. Мазунина В.П. В них предложены и обоснованы нелинейные системы любого порядка с автоматическим формированием процессов, максимально приближенных к оптимальным по быстродействию, при широком диапазоне задающих воздействий и качественном регулировании. Обоснована физически оптимальная по быстродействию нелинейная базовая модель (НБМ) систем, разработана и развивается методика создания оптимизированных ЭМС при приближенном описании свойств механизмов.

В рамках развития этой методики актуальны дальнейшие разработки, к числу которых относятся: а) снижение погрешности в определении величины параметрических ограничений (аппроксимации их фиксированными параметрами апериодического звена явно недостаточно); б) обоснование ограничений для систем с многоконтурными объектами, в том числе при перекрёстных и упругих связях; в) выявление нереализуемых процессов на основе анализа исходных данных с исключением несоответствия между исходными ограничениями по данным оборудования и физически реализуемыми ограничениями.

Таким образом, развитие методики создания оптимизированных по быстродействию ЭМС на основе НБМ позволит расширить область их применений для большого числа механизмов.

**Объектом исследования** являются нелинейные замкнутые многоконтурные электромеханические системы управления со структурой нелинейной базовой модели с ограничением координат в сложных объектах управления, в том числе с упругостью в механизмах.

**Цель работы** состоит в развитии методики предельно достижимого управления нелинейными быстродействующими электромеханическими системами с определением параметрических и физических ограничений, обусловленных сложной структурой объекта, в том числе упругостью в механизмах.

#### **Основные задачи исследований:**

1. Анализ особенностей управления нелинейными быстродействующими многоконтурными электромеханическими системами с устойчивой линейной внутренней частью, относящейся к объекту, и с колебательными механизмами, содержащими упругие связи.
2. Развитие методики расчета характеристик нелинейных звеньев управления в многоконтурных электромеханических системах с учётом линейной внутренней части, описываемой дифференциальным уравнением высокого порядка, в том числе при упругих связях в механизме, с целью повышения их быстродействия при эффективном демпфировании механических колебаний.
3. Развитие структуры нелинейных быстродействующих многоконтурных электромеханических систем управления на основе нелинейной базовой модели с учетом возможных вариантов совокупности физических ограничений и выявлением нереализуемых процессов.
4. Экспериментальное подтверждение результатов разработок и методических рекомендаций.

**Методы исследования.** Теоретические исследования выполнены с привлечением методов теории автоматического регулирования (частотные логарифмические характеристики, интегральные критерии качества процессов), теории колебаний (демпфирование), теории оптимального управления (быстродействие), теории электропривода (многоконтурные замкнутые линейные и нелинейные электромеханические системы). Анализ выполнен с использованием пакетов MathCAD, MatLab. Моделирование ряда реализаций быстродействующего электропривода с привлечением численных методов решения дифференциальных уравнений осуществлено в среде Turbo Pascal. Натурные испытания проведены на стенде электропривода, оборудованного тиристорной системой управления постоянного тока Simoreg 6RA70 фирмы Siemens.

**Научная новизна:**

1. Развита методика расчета характеристик нелинейных звеньев управления ЭМС 2-4-го порядка с многоконтурной внутренней частью и определением параметрических ограничений, а также областей линейного и нелинейного управления.
2. Разработана методика формирования характеристик управления, обеспечивающая сопряжение линейной и нелинейной областей с определением контурных коэффициентов в объекте по условиям оптимизации демпфирования упругих колебаний.
3. Предложена методика синтеза регулятора ускорения с ограничением задания производной ускорения на основе интегральной оценки процессов при сохранении физически оптимального быстродействия и эффективном демпфировании механических колебаний.
4. Обосновано дополнение функций быстродействующих нелинейных замкнутых многоконтурных электромеханических систем функцией предварительного определения физически достижимых уровней ограничений с целью исключения нереализуемых режимов управления.

**Достоверность научных результатов** обусловлена использованием апробированных математических методов и подтверждена результатами моделирования конкретных электромеханических систем при различных физических и параметрических ограничениях и вариантах их сочетаний, а также натурными испытаниями.

**Практическая ценность работы.**

1. Расширена область применения систем на основе нелинейной базовой модели на группы электроприводов с многоконтурной структурой устойчивого (неколебательного) и колебательного объектов.
2. Предложено дополнение многоконтурных электромеханических систем на основе нелинейной базовой модели функциональным блоком предварительной оценки реализуемости исходной совокупности физических и параметрических ограничений с одновременным уточнением порядка систем.

3. Апробировано и рекомендовано применение дополнительного ограничения производной ускорения (динамического момента) в нелинейной системе с упругостью, повышающее качество управления при эффективном демпфировании.
4. Результаты представлены в форме положений и рекомендаций, которые могут использоваться в инженерных методиках проектирования и настройке электроприводов при пуско-наладочных работах.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Развитие методики расчёта нелинейных характеристик звеньев управления в быстродействующих системах с многоконтурным объектом с заданными показателями устойчивости, реализацией сопряжения линейной и нелинейной областей управления.
2. Обоснование методики реализации максимального быстродействия систем при увеличении линейной области управления с целью эффективного демпфирования механических колебаний.
3. Методика ввода дополнительного ограничения производной ускорения в объекте нелинейной системы с упругостью с целью повышения качества управления при эффективном демпфировании.
4. Развитие методики определения достижимых (реализуемых) уровней физических и параметрических ограничений, в том числе с колебательным объектом (упругостью) в системе.

**Апробация работы.**

Основные положения данной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции по механике и процессам управления моторно-трансмиссионных систем транспортных машин (Курган, 2003 г.); II Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии», (Темиртау, 2003 г.); четырнадцатой и пятнадцатой научно-технических конференциях “Электроприводы переменного тока” (Екатеринбург, 2007, 2012 г.г.); XXXVIII Уральском семинаре «Механика и процессы управления» (Миасс, 2008 г.); 47-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Нижний Новгород, 2008 г.); всероссийской научной конференции молодых ученых «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ.» (Новосибирск, 2009 г.); VII Международной Научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», (Омск, 2009 г.); 6-й Международной научно-технической интернет-конференции «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике» (Пермь, 2012 г.), а также российских научно-технических конференциях, проводимых ФГБУН Институтом машиноведения УрО РАН в 2007-2012г.г.

**Публикации.** По результатам исследований и материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, приложения, включает в себя 129 страниц машинописного текста, 30 иллюстраций и 79 наименований цитированной литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая ценность, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор сведений по проблеме создания быстродействующих многоконтурных нелинейных широкодиапазонных систем управления электроприводами интенсивно работающих механизмов, конкретизированы задачи исследования, проанализированы основные разработки, относящиеся к теме диссертации. Отмечено, что большинство исследований ЭМС и их быстродействия выполняется в рамках теории автоматического регулирования. Известные разработки моделей многоконтурных систем подчинённого регулирования (Kessler С., Р., Frohr F., Orttenburger F., Vuxbaum A., Ключев В.И., Сабинин Ю.А., Вейнгер А.М., Шрейнер Р.Т. и др.) базируются на принципе диакоптики: с одним интегратором и регулятором, линейной жёсткой отрицательной обратной связью в каждом контуре при неполном приближенном описании объекта с эквивалентной некомпенсируемой малой постоянной времени внутреннего контура  $T_\mu$ . Из-за учёта только параметрических ограничений использование этих моделей для систем управления ограничено.

В обзоре обращается внимание на то, что на современном уровне развития ЭМС возросла роль физических (амплитудных) ограничений координат электропривода, в том числе его силовой части, по сравнению с ролью параметров линейных регуляторов и  $T_\mu$ . Поэтому в новых разработках вводится понятие допустимого пространства состояний систем. Отмечено также, что в рамках оптимизации по быстродействию на основе принципа максимума Понтрягина Л.С. исследовались ЭМС в трудах Александровского Н.М., Пышкало В.Д., Петрова Ю.П., Лернера А.Я., Бор-Раменского А.Е., Воронежского Б.Б., Святославского В.А., Чистова В.П., Бондаренко В.И., Хамкова А.Я., Терехова Н.И., Мазунина В.П. и др. Наиболее существенными для прикладных разработок являются результаты исследований Мазунина В.П. для ЭМС с многоконтурной структурой.

В работах Мазунина В.П. обоснована физически реализуемая, предельная по быстродействию нелинейная базовая модель  $n$  - порядка ( $n = 2, 3, \dots, N$ ) при физических, параметрических и энергетических ограничениях.

На рис.1 приведена структура НБМ (ограничена 6-м порядком), где обозначены: 1 - узел расчёта ограничений в функции уровня задания; 2- узел ввода задания и воздействий; 3 - объект;  $K1, \dots, K6$  - нелинейные звенья управления, включающие в себя функции регуляторов,  $x_g$  - входное задание. В звенья  $K1, \dots, K5$  входят блок  $(D)$  ограничения  $\dot{x}_m^i$ , блок  $(H)$ , содержащий характери-

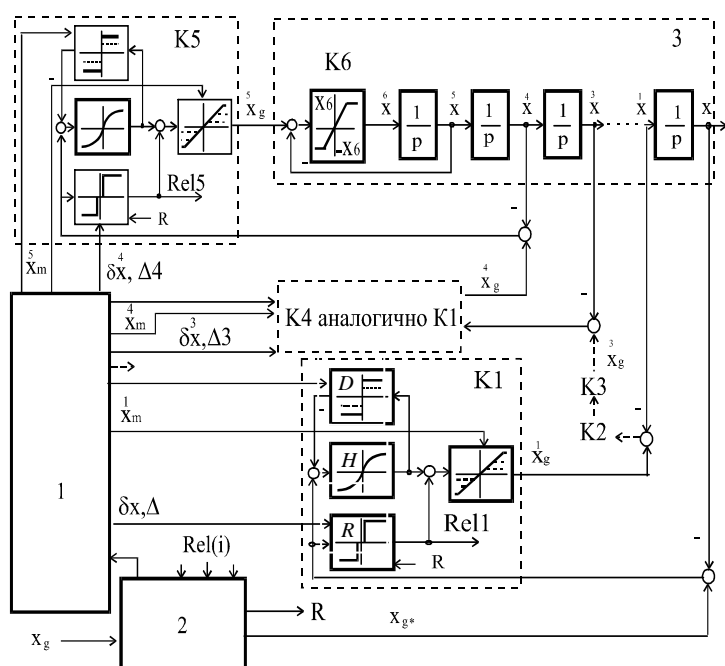


Рисунок 1 - Структура НБМ (до 6-го порядка)

стику переключений по рассогласованию, блок ( $R$ ) ввода дополнительного воздействия  $Rel(i)$  с амплитудой  $\delta x$  и зоной  $\Delta$ ,  $R$  – сигнал запрета для  $Rel(i)$ . Функции  $K6$  близки к функциям регулятора, но в нем введено физическое ограничение высшей производной ( $X6$ ), при этом определено, что  $T_3 = 1/K6$ . Структура НБМ явилась развитием структуры линейной многоконтурной модели систем подчинённого регулирования. Применение НБМ позволяет решать задачи быстрогодействия управления путем ввода нелинейных звеньев управления, ограничения координат и учёта

инерции приближённо описанной некомпенсированной линейной частью объекта. Данная структура принята базовой для создаваемых ЭМС и ниже является исходной для исследований.

При оптимальном управлении возрастает актуальность представления объекта НБМ более сложными звеньями, чем апериодическое звено. В существующих разработках отсутствуют рекомендации по повышению точности аппроксимации сложной многоконтурной части объекта в рамках нелинейного управления. Если некомпенсированная линейная часть может быть описана не только апериодическим звеном, но и более сложным, например, многоконтурной устойчивой линейной подсистемой, то возрастает роль оценки аппроксимации внутреннего контура в НБМ, что в итоге сказывается на величине  $T_3$ . Порядок НБМ, используемой для синтеза звеньев управления, определяется в том числе и детализацией объекта управления. Это уточнение в ЭМС необходимо для методики формирования характеристик управления и обеспечения максимального быстрогодействия.

Исследования объектов с упругостью в известных работах предпринимались только в линейной области с целью демпфирования колебаний. Результаты разработок и методики представлены в работах Борцова Ю.А., Соколовского Г.Г., Жильцова Л.В., Ключева В.И., Калашникова Ю.Т., Клепикова В.Б., Шестакова В.М. на основе графоаналитических частотных методов, а также Землякова В.Д., Задорожного Н.А. с использованием выводов акад. Мандельштама Л.И. в теории колебаний. Исследования демпфирования в условиях управления с ограничениями не выполнялись, в то время как возросла их актуальность в свете современных достижений в сфере регулирования (уменьшение  $T_3$ ). Последнее привело к необходимости учета механических колебаний в процессах,



подбора характеристик быстродействующего силового электрооборудования для повышения эффективности демпфирования.

Кроме того, выполнение функций в НБМ ориентировано на все возможные физические ограничения вплоть до предельных значений. Однако анализ показал, что возможны комбинации заданных предельных ограничений, при которых переходные процессы в НБМ неосуществимы. Они должны быть исключены вследствие недостатков выбора оборудования. Актуальна разработка методики определения достижимых уровней ( $x_m^i \leq X_i$ ) этих ограничений и выполнимых соотношений ( $x_m^i / x_m^{i+1}$ ). Это должно отразиться на характеристиках управления, распределении областей управления на линейную и нелинейную, расчётном времени процессов.

На основании проведенного анализа разработок сформулирована цель и задачи исследования, перечисленные выше.

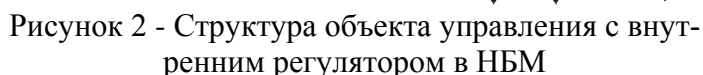
**Вторая глава** посвящена результатам исследования систем в области параметрических ограничений со сложным объектом управления, в том числе механизмом с упругостью.

Для неколебательной линейной части системы выявлены условия её аппроксимации с уточнением  $T_3$  в рамках функций НБМ. Для линейной части с колебательным объектом, описывающим механизм с упругостью, разработан порядок определения параметрических ограничений с использованием настроек в системах по критериям оптимального демпфирования колебаний.

#### Внутренняя часть системы - неколебательный линейный объект.

В исходной НБМ (рис.1) во внутренней части системы в аperiodическом звене реализовано условие  $x_g^n = x(t) \quad (x_g^6 = x(t))$ , где обоснована нелинейная аппроксимация процессов в объекте на интервале времени  $t_x = 2T_3$  при «скачке» задания, что соответствует их интегральной оценке при  $t_x \gg 2T_3$ . На практике же интервалы соизмеримы с  $2T_3$ , что вносит погрешности в определении  $t_x$  и характеристик звеньев управления. В работе обоснована область такого приближения при ограниченном интервале и сложном описании объекта дифференциальными уравнениями высокого порядка, уточнены пределы этой аппроксимации на основе переходных функций.

Исследована внутренняя часть системы ( $W_0(p) \neq 1$ ), представленная на рис. 2 многоконтурным линейным объектом 3. Так в электроприводах внутренняя линейная часть, которую можно описать передаточной функцией на основе принципа диакоптики, представлена контурами напряжения, тока, узлами компенсации перекрёстных связей и инерции, доступной для компенсации. Например, в устойчивой линейной модели  $W_0(p)$  3-го порядка с контурными коэффициентами  $K_{61}, K_{62}, K_{63} = 1/T_\mu$  с опорой на критерии быстродействия и минимальной колебательности рассмотрен прикладной идеальный фильтр ПИФ. Тогда при  $K_6 = 1/T_3$  определено  $K_6/K_{61}/K_{62}/K_{63} = (1/8T_\mu)/(1/4T_\mu)/(1/2T_\mu)/(1/T_\mu)$ .


$$J_i = \int_0^{\tau_x} (1 - h_i(\tau)) d\tau$$

при одном и том же  $x_g \leq X_6$ ,  
где  $\tau_x$  - интервал интегрирова-

ния;  $\tau = t/T_0$  - текущее время;  $h_i(\tau)$  – переходные функции звеньев 1-го (апериодического), 2, 3-го порядков;  $i$  - порядок звена.

По условию интеграл  $J_0 = 1$ , когда уровень  $X6$  ( $h_i(\tau) = 1$ ) достигается при скачке виртуальной  $X7$  за  $t_x = 2T_3$ . Исследование показало, что в случаях, когда интервалы движения до  $X6$  по переходной функции сопоставимы с  $2T_3$ , требуется корректировка в определении величины  $2T_3$ , определяемая из соотношения ( $J_0/J_i$ ). Так для интервала  $2T_3$ :  $J_1 = 1,135J_0$ ;  $J_2 = 0,944J_0$ ;  $J_3 = 0,933J_0$ . Для интервала  $4T_3$ :  $J_1 = 1,006J_0$ ;  $J_2 = 0,996J_0$ ;  $J_3 = 1,004J_0$ . Соответственно требуется коррекция коэффициента при  $T_3$  в расчётных характеристиках звеньев управления (см. (11), (12)).

Внутренняя часть - колебательный линейный объект с упругостью.

Исследованы электроприводы с двухмассовым механизмом и упругим валом (или клиноремённой передачей) без учёта внутренней и внешней механической диссипации. Эффективность демпфирования колебаний исследована с учетом особенностей реализации ЭМС при обратной связи по ускорению (динамическому моменту первой массы) в объекте. На рис. 3 приведена исследуемая ЭМС управления скоростью со структурой НБМ.

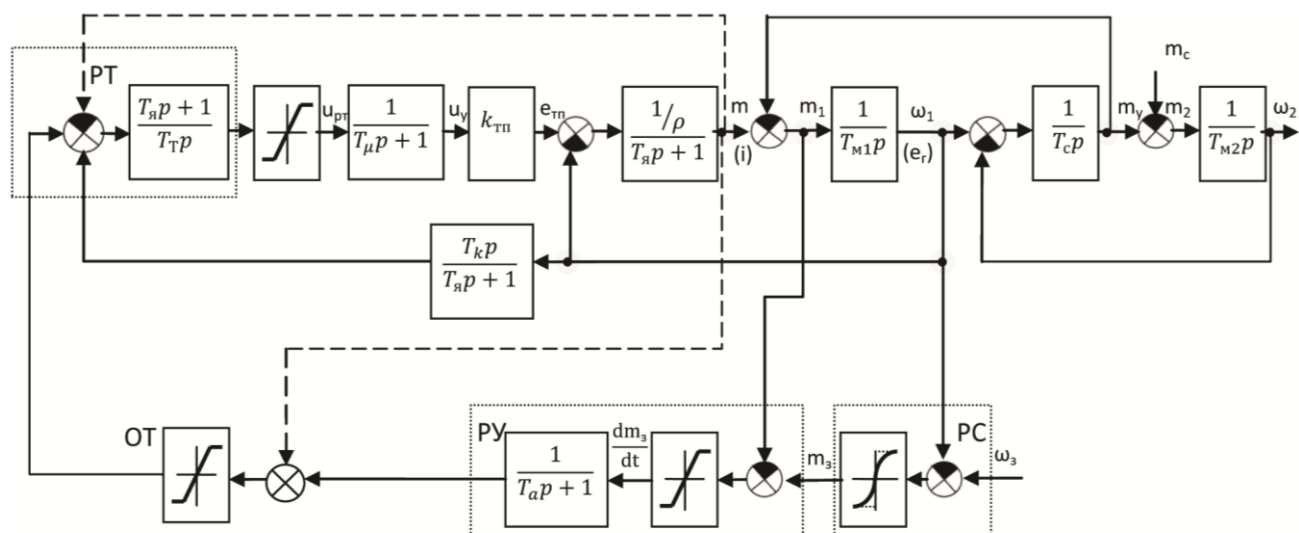


Рисунок 3 - Структурная схема нелинейной двухмассовой ЭМС

Обозначены относительные величины:  $\omega_3, \omega_1, \omega_2$  – задание скорости, скорость первой и второй масс;  $m, m_y, m_c$  – полный, упругий и статический моменты;  $m_1, m_2$  – динамические моменты (аналог ускорения), приложенные к

первой и второй массам ( $m = m_1 + m_2 + m_c$ );  $i$  – ток двигателя ( $i \equiv m$ );  $PT$  – регулятор тока;  $PV$ ,  $PC$  – звенья управления (регуляторы) ускорения, скорости;  $OT$  – узел ограничения тока;  $T_a$  – постоянная времени как составляющая расчетной постоянной  $T_e$  ( $T_e = T_a + T_\mu$ ) в контуре ускорения;  $T_c$ ,  $T_{M1}$ ,  $T_{M2}$  – постоянная времени упругого звена, постоянные инерции первой и второй масс в механизме;  $T_y$ ,  $T_T$ ,  $T_K$  – постоянные времени электромагнитная якоря, контура тока, компенсирующего звена;  $u_y$ ,  $e_{ТП}$  – напряжение управления и э.д.с. на выходе тиристорного преобразователя с постоянной  $T_\mu$  фильтра на его входе. Функции  $PV$ ,  $PC$  расширены до звеньев управления. На рис. 4. приведена ЭМС в линейной области с постоянными коэффициентами.

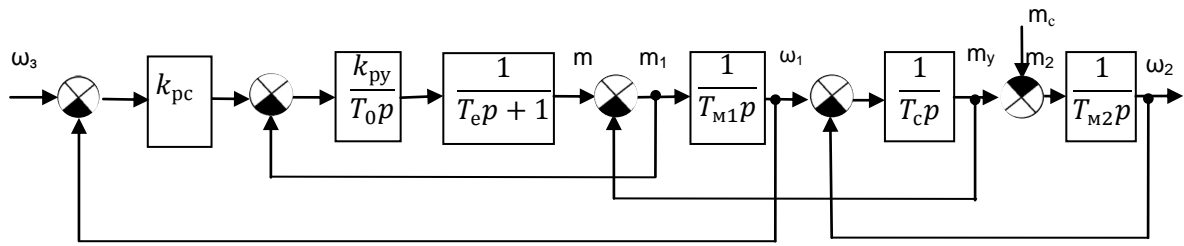


Рисунок 4 - Структурная схема линейной двухмассовой ЭМС

Внутренний контур ускорения относится к объекту и регламентирует параметрические ограничения, его коэффициент  $k_{py}$  должен рассчитываться по условиям демпфирования механических колебаний. Известно, что оптимальное демпфирование достигается, если характеристический полином 4-го порядка этого замкнутого контура  $Q_y$  имеет две пары равных корней с собственной частотой, совпадающей с частотой колебаний механизма.

Если  $Q_y(p) = (T_y^2 p^2 + dT_y p + 1)^2$ , то

$$\frac{T_0}{k_{py}} = \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} T_y; T_e = \frac{T_y}{2\sqrt{\gamma-1}}; T_y = \sqrt{\frac{T_{M1} T_{M2} T_c}{T_{M1} + T_{M2}}};$$

$$\gamma = \frac{T_{M1} + T_{M2}}{T_{M1}}; 2\varepsilon = d = \sqrt{\gamma - 1}. \quad (1)$$

При этом контур скорости доступен для нелинейного управления.

В то же время по окончании процессов «в большом» состоянии системы с двумя контурами в линейной области открывает возможности улучшения демпфирования с уточнением  $k_{py}$  и  $k_{pc}$ . Это состояние системы исследовано с помощью разложения на множители полинома 5-го порядка знаменателя  $Q_c(p)$  передаточной функции  $W_c(p)$  замкнутой системы с выходом  $m_y$  (при  $m_c=1$ ):

$$W_c(p) = \frac{m_y(p)}{m_c(p)} = \frac{\frac{T_{M1} T_0}{k_{pc} k_{py}} T_e p^3 + \frac{T_{M1} T_0}{k_{pc} k_{py}} p^2 + \frac{T_{M1}}{k_{pc}} p + 1}{Q_c(p)}, \quad (2)$$

$$Q_c(p) = \gamma \frac{T_{M1} T_0}{k_{pc} k_{py}} T_e T_y^2 p^5 + \gamma \frac{T_{M1} T_0}{k_{pc} k_{py}} T_y^2 p^4 + \gamma \frac{T_{M1}}{k_{pc}} \left( \frac{T_0}{k_{py}} T_e + T_y^2 \right) p^3 + \gamma \left( \frac{T_{M1} T_0}{k_{pc} k_{py}} + T_y^2 \right) p^2 + \frac{T_{M1}}{k_{pc}} p + 1. \quad (3)$$

Если полином  $Q_c(p)$  привести к виду  $(cT_y p + 1)(aT_y^2 p^2 + bT_y p + 1)^2 = Q_c(p)$ , то неизвестными будут  $a$ ,  $b$ , и  $c$ . В результате поиска их значений на основе алгеб-

раического критерия качества переходных функций (Воронов В.С.) определено  $a = c^2$ , тогда:

$$T_e = \frac{\sqrt[4]{\gamma}}{2(\sqrt{\gamma-1}+\sqrt{\gamma})-1} T_y; \frac{T_0}{k_{py}} = \frac{1}{\sqrt[4]{\gamma}} T_y; \frac{T_{m1}}{k_{pc}} = \sqrt[4]{\gamma}(2(\sqrt{\gamma-1}+\sqrt{\gamma})-1) T_y; \\ a = \sqrt{\gamma}; b = \sqrt[4]{\gamma}(\sqrt{\gamma}+\sqrt{\gamma-1}-1). \quad (4)$$

Однако если обратиться к управлению (нелинейной области, или «в большом»), то при определенном сочетании физических и параметрических ограничений в системе в интервалах с ограничением задания ускорения (на выходе РС) происходит размыкание контура скорости, замкнутым остается только контур ускорения. На этих интервалах демпфирование с параметрами  $k_{py}$ ,  $T_e$  по (4) не оптимально, из-за чего требуется оперативная перестройка их по (1) в реальном времени.

Дополнительное исследование показало, что в некоторых случаях можно не ориентироваться на перестройку ограничений, особенно при малых соотношениях масс  $\gamma$ , видоизменив при этом представление полинома (3). Установлено, что параметры полинома (3) можно выбрать по принципу диакоптики: «вложение» полинома знаменателя передаточной функции контура ускорения ( $Q_{yп}(p)$ ) в полином контура скорости ( $Q_{сп}(p)$ ):

$$Q_{yп}(p) = T_1 p(T_2 p(T_3 p(T_e p + 1) + 1) + 1) + 1; \\ Q_{сп}(p) = T_4 p(Q_{yп}(p) + 1) + 1. \quad (5)$$

Принимая соотношение  $T_4/T_1$  в (5), например, равным ПИФ, получаем:

$$T_e = \frac{T_y}{\sqrt{2(\gamma+1)}}; \frac{T_0}{k_{py}} = \frac{\sqrt{2(\gamma+1)}}{\gamma} T_y; \\ \frac{T_{m1}}{k_{pc}} = \sqrt{2}(\sqrt{\gamma+1} + \sqrt{1+2\gamma}) T_y. \quad (6)$$

Анализ (6) показал, что в этом случае реализуется эффективное демпфирование без перестройки параметров во всех режимах при одновременном снижении величины первых «пиков» упругого момента. Причём полностью ПИФ реализуется при  $\gamma = 3$ , а при меньших  $\gamma$  это выполняется частично, только для внешних контуров (см. (5)). Эффективность демпфирования с параметрами по формулам (4), (6) подтверждена при моделировании оценками показателя колебательности и декремента затухания. Их можно рекомендовать для методики синтеза систем.

Методика демпфирования в одном контуре эффективна и для систем регулирования скорости электроприводов переменного тока, когда используется обратная связь по току двигателя. При этом в качестве звена с постоянной  $T$ , служит замкнутый контур тока, а вместо регулятора ускорения присутствует регулятор скорости ( $T_0$  вместо  $T_{m1}$ ). В частности, при допущении  $T_e = 0$  для асинхронного двигателя возможна формулировка требований к параметрам механической характеристики по условиям демпфирования. Для полинома знаменателя  $Q_{сп}(p)$  в (5) при одинаковых соотношениях постоянных получаем:  $1/s = k = (T_{m1}/T_y)\sqrt[4]{\gamma}$ , где  $s$  – скольжение.

**В третьей главе** исследована и дополнена методика синтеза систем управления со структурой НБМ при сложных, в том числе колебательных, объектах. При этом выполнен анализ исходной совокупности заданных ограничений координат. Исследования привели к уточнениям НБМ и разработке алгоритма определения достижимых уровней исходных ограничений при каждом задании, исключению физически не реализуемых вариантов управления.

#### Внутренняя часть системы - линейный объект.

Исследованы системы с неколебательным объектом при параметрических ограничениях:  $2T_3 = 10$  мс (умеренное быстродействие);  $2T_3 = 1,25$  мс (высокое быстродействие). По закономерностям управления в НБМ диапазон управления содержит линейную часть в окрестностях нуля рассогласований во всех контурах с соотношением коэффициентов  $1/2$  (ПИФ), предельным для НБМ.

Согласно структуре НБМ (рис.1 и рис.2) на примере модели 4-го порядка выбраны параметры и соотношения между физическими ограничениями, типичные для многих электроприводов:  $X1 = \overset{1}{x}_g = 9$ ;  $X2 = 90$ ;  $X3 = 4500$ ;  $X4 = 450000$ . Соотношения коэффициентов усиления в линейной области связаны с параметрическим ограничением  $T_3$ . При  $K4 = 1/T_3 = 1/0,005$  с получаем  $K4_{л}/K3_{л}/K2_{л}/K1_{л} = 200/100/50/25$ , при  $K4 = 1/T_3 = 1/0,000625$  с –  $K4_{л}/K3_{л}/K2_{л}/K1_{л} = 1600/800/400/200$ . Причём в исходной НБМ во внутреннем контуре (1-го порядка) характеристика  $K4$  является линейной ( $K4 = 1/T_3$ ), а ограничением является  $X4$ . Расчётные граничные точки нелинейных характеристик определены при  $2T_3 = 10$  мс и  $2T_3 = 1,25$  мс. При умеренном быстродействии для  $K3$ :

$$\overset{2}{x}_{п1} = 45 \text{ при } \overset{3}{x}_{m1} = X3, \quad \overset{2}{x}_{п2} = 45 \text{ при } \overset{3}{x}_{m2} = X3.$$

$$\text{То же для } K2: \quad \overset{1}{x}_{п1} = 1,8 \text{ при } \overset{2}{x}_{m1} = X2, \quad \overset{1}{x}_{п2} = 1,8 \text{ при } \overset{2}{x}_{m2} = X2,$$

$$\text{для } K1: \quad x_{п1} = 0,63 \text{ при } \overset{1}{x}_{m1} = X1, \quad x_{п2} = 0,144 \text{ при } \overset{1}{x}_{m2} = 3,6.$$

При высоком быстродействии для  $K3$ :

$$\overset{2}{x}_{п1} = 25,32 \text{ при } \overset{3}{x}_{m1} = X3, \quad \overset{2}{x}_{п2} = 0,7 \text{ при } \overset{3}{x}_{m2} = 562,5.$$

$$\text{То же для } K2: \quad \overset{1}{x}_{п1} = 1,4 \text{ при } \overset{2}{x}_{m1} = X2, \quad \overset{1}{x}_{п2} = 0,0035 \text{ при } \overset{2}{x}_{m2} = 1,4,$$

$$\text{для } K1: \quad x_{п1} = 0,59 \text{ при } \overset{1}{x}_{m1} = X1, \quad x_{п2} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ при } \overset{1}{x}_{m2} = 0,007.$$

Формулы для расчётов граничных точек приведены ниже при описании алгоритма оценки ограничений.

Анализ данных показывает, что настройка на умеренное быстродействие ( $2T_3 = 10$  мс) отражает случай, когда нелинейные характеристики управления полностью аппроксимированы прямыми, нелинейность представлена только в форме ограничений, а максимальные ограничения достигаются только для  $X2$  (при задании  $X1 = 9$ ). Во внутреннем контуре с  $K4$  значение  $X4$  достигается «в точке». Поэтому в работе остаются линейными контуры с  $K2$ ,  $K3$ ,  $K4$ , а заданием для линейной части становится  $\overset{2}{x}_g$ , что соответствует функциям НБМ 2-го

порядка со сложной внутренней линейной частью с возможностью аппроксимации её апериодическим звеном.

Таким образом, подтверждено, что НБМ высокого порядка со сложной внутренней линейной частью, когда высшие производные не достигают ограничений в нелинейных контурах, можно представить НБМ меньшего порядка.

При высоком быстродействии ( $2T_3 = 1,25$  мс) установлено, что с увеличением порядка системы доля  $T_3$  в формировании переходного процесса уменьшается, решающую роль играют физические ограничения и нелинейные связи. Поэтому для НБМ 4-го и более высокого порядка представление линейной внутренней части системы апериодическим звеном с его аппроксимацией ( $2T_3$ ) вполне обосновано. В НБМ меньшего порядка с внутренним апериодическим звеном расчётное значение аппроксимации отлично от  $2T_3$  и должно уточняться.

#### Внутренняя часть - колебательный линейный объект с упругостью.

При управлении нелинейной системой с колебательным объектом формирование процессов в отличие от задачи демпфирования (рис. 4) происходит с однонаправленным воздействием на обе инерционные массы механизма. Движение первой ( $\omega_1$ ) и второй ( $\omega_2$ ) инерционных масс механизма (рис.3) происходит согласованно с учётом динамических характеристик взаимосвязи между ними. Поскольку контур ускорения (демпфирования) во всех режимах остаётся линейным, структура системы при управлении ( $m_c = 0$ ) и физическом ограничении только в контуре скорости приводится к виду, показанному на рис. 5. Обозначены: 1 – нелинейное звено управления скоростью с заданием  $\omega_3$ ; 2 – замкнутый контур ускорения; 3 – объект (механизм). На входе 2 задаётся момент двигателя  $m_3$  всей системы с пересчётом ( $1/\gamma$ ) до  $m_1$ . В составе 1 показан блок вычисления максимально возможных значений координат при управлении.

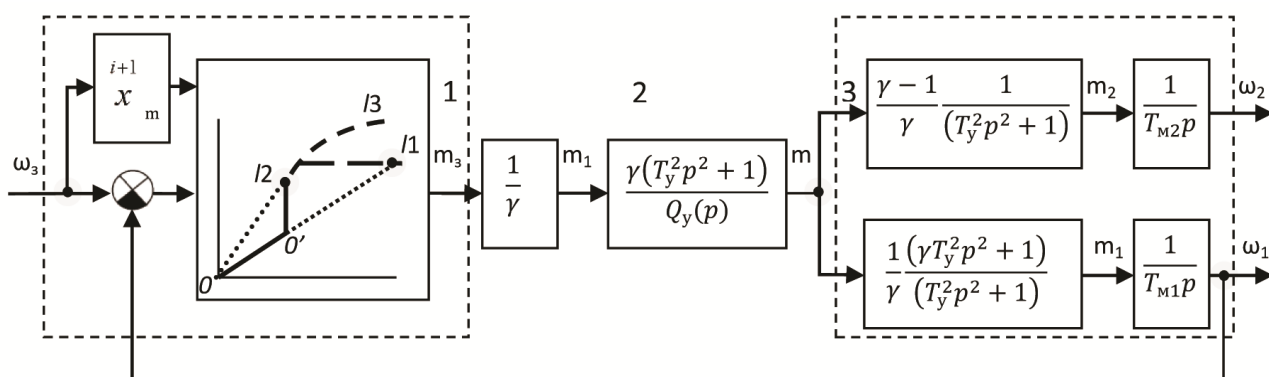


Рисунок 5 - Система управления с упругим звеном при  $m_c = 0$

Сложная часть системы - звенья 2 и 3 (рис. 5) - характеризуется увеличенным параметрическим ограничением ( $T_{ec} \geq T_3$  в «жесткой» системе), если представить  $T_{ec}$  эквивалентной постоянной времени замкнутого контура ускорения. Поэтому максимально допустимый коэффициент усиления РС в линейной области характеристики управления  $(k_{pc})_{доп}$  (по параметрам ПИФ) выше

расчётного ( $k_{рс}$ ) по условию эффективного демпфирования. Таким образом, если выбрать  $k_{рс}$ , то происходит увеличение линейной области с возрастанием времени переходных процессов относительно ожидаемого. Если выбрать  $(k_{рс})_{доп}$ , то демпфирование будет неэффективным, ожидаются колебания в процессах. Для условия, когда  $(k_{рс})_{доп} \geq (k_{рс})$ , предложена и апробирована функция перехода с характеристики управления на характеристику эффективного демпфирования на границе линейной области. Этим обеспечено быстрое действие, и сохранены параметры демпфирования.

На рис. 5 в составе звена 1 представлен один из реализованных вариантов перехода. В блоке РС реализованы нелинейная характеристика (участок I2- I3), ограничение задания последующему контуру (горизонталь I1), а также линейная характеристика с  $(k_{рс})_{доп}$  (прямая 0-I2) и  $k_{рс}$  для демпфирования (прямая 0-0'-I1). Сопряжение прямых 0-I2 и 0-0'-I1 выполнено «скачком» с получением новой характеристикой управления: 0-0'-I2-I1. Этим сокращена линейная область от I1 до I2 по входному рассогласованию ( $\omega_3 - \omega$ ).

#### Совокупность ограничений и исключение нереализуемых процессов.

В звене 1 (рис.5) на входе РС введён блок вычисления и установки достижимых уровней ограничений  $x_m^{i+1} \in (0; X(i+1)]$  при данном задании  $X_i$  (горизонталь I1в РС, а в случае систем более высокого порядка и в других звеньях управления). Необходимость в вычислителе возникла при анализе заданных (исходных) пределов координат, исходя из технических данных оборудования и сравнения их с достижимыми пределами координат на этапе синтеза систем. Особенность нелинейных звеньев управления (1 на рис.5) в том, что их характеристики определяются совокупностью параметров линейной части системы и всех физических ограничений координат.

После синтеза системы на основе НБМ целесообразно привести все ограничения к одной точке, в качестве которой следует использовать выход системы (на рис. 5 – скорость). Тогда между координатами интегральные связи становятся «единичными» и приобретают физический смысл скорости, ускорения, производной ускорения и т.д. (выходная координата и её производные). Для системы приведение сводится к вычислению модулей  $X_i$ :

$$\begin{aligned} X &= \omega_{доп}; \\ X1 &= m_{доп}/T_m; \\ X2 &= (dm/dt)_{доп}/T_m. \end{aligned} \quad (7)$$

Соотношения  $X/X1$ ,  $X1/X2$  и т.д. имеют размерность времени. Известно, что для реализации управления в НБМ физически объяснимо чередование всех ограничений с выполнением фундаментальных неравенств вида:

$$\frac{X_i}{X(i+1)} \geq \frac{X(i+1)}{X(i+2)} + \dots + \frac{X(n-1)}{X_n} + 2T_3. \quad (8)$$

На основе (8) определены интервалы  $\tau_i$  постоянства  $X_i$ , расчетное время физически оптимальных процессов  $t_{опт}$  и количество интервалов  $N$ :

$$\tau_i = \frac{X_i}{X(i+1)} - \left( \frac{X(i+1)}{X(i+2)} + \dots + \frac{X(n-1)}{X_n} + 2T_3 \right);$$

$$t_{\text{опт}} = \frac{X}{X_1} + \frac{X_1}{X_2} + \dots + \frac{X(n-2)}{X(n-1)} + \frac{X(n-1)}{X_n} + 2T_3,; \quad N = (2^n - 1). \quad (9)$$

Однако при исходной (по данным оборудования) совокупности ограничений  $X, \dots, X_i, \dots, 2T_3$  возможны обратные неравенства вида:

$$\frac{X_i}{X(i+1)} - \left( \frac{X(i+1)}{X(i+2)} + \dots + \frac{X(n-1)}{X_n} + 2T_3 \right) < 0. \quad (10)$$

Они физически не реальны и должны быть исключены. Поэтому в подобных случаях в (10) требуется применить знак равенства и найти достижимые  $x_m^{i+1}$  в пределах  $(x_m^{i+1})_{\min} \leq x_m^{i+1} \leq X(i+1)$ , чтобы использовать их как максимально возможные при управлении. Здесь  $(x_m^{i+1})_{\min}$  - граница нелинейной области.

Указанные вычисления являются алгебраическими, выполняются с циклами уточнений, для их выполнения разработана процедура, которая представлена на рис. 6 в форме алгоритма.

Анализ и вычисления с использованием закономерностей (8), (9) необходимо выполнять, начиная с подсистемы (НБМ) 2-го порядка, в которой характеристика переключений, вычисляемая при  $\tau_i = 0$ , имеет вид:

$$x_m^{n-1} = \sqrt{2 \cdot X_n \left( x_g^{n-2} - x^{n-2} \right)_{\Pi} + (X_n \cdot T_3)^2 - X_n \cdot T_3} \quad (11)$$

при  $X(n-1) \geq x_m^{n-1} \geq X_n \cdot 2T_3$ .

При  $x_m^{n-1} < X_n \cdot 2T_3$  время процесса не изменяется,  $\frac{x_m^{n-1}}{X_n} = 2T_3$ , причем:

$$K(n-1) \leq 1/2T_3. \quad (12)$$

Вычисления оканчиваются анализом внешнего контура НБМ.

Неравенства (8) следуют из основных уравнений для НБМ  $n$ -го порядка. В случаях (10) с помощью алгоритма (рис.6) выполняется переопределение значений координат до уровня допустимых. В следующем контуре НБМ - подсистеме 3-го порядка - характеристика переключений определяется аналогично:

$$x_m^{n-2} = \frac{-X(n-1)}{2} \cdot \left( \frac{X(n-1)}{X_n} + 2T_3 \right) + \sqrt{2 \cdot X(n-1) \left( x_g^{n-3} - x^{n-3} \right)_{\Pi} + \frac{(X(n-1))^2}{4} \cdot \left( \frac{X(n-1)}{X_n} + 2T_3 \right)^2} \quad (13)$$

при  $X(n-2) \geq x_m^{n-2} \geq x_{m1}^{n-2}$ , где  $\left( x_g^{n-3} - x^{n-3} \right)_{\Pi 1} = \frac{x_{m1}^{n-2}}{X(n-1)}$ . Далее при  $x_{m1}^{n-2} \geq x_m^{n-2} \geq x_{m2}^{n-2}$

решение уравнения  $\left( x_m^{n-2} \right)^3 + 2T_3 \cdot X_n \cdot \left( x_g^{n-3} - x^{n-3} \right)_{\Pi} x_m^{n-2} - X_n \cdot \left( x_g^{n-3} - x^{n-3} \right)_{\Pi}^2 = 0$  нахо-

дится относительно  $x_m^{n-2}$  до  $x_m^{n-1} = 2T_3 \cdot X_n$ , затем:



$$x_{m2}^{n-2} = 8T_3^2 \cdot Xn, \left( x_g^{n-3} - x^{n-3} \right)_{п2} = 32 \cdot Xn \cdot T_3^3, \text{ при } x_m^{n-2} \leq x_{m2}^{n-2} \quad K(n-2) \leq \frac{1}{4T_3} \text{ и т.д.}$$

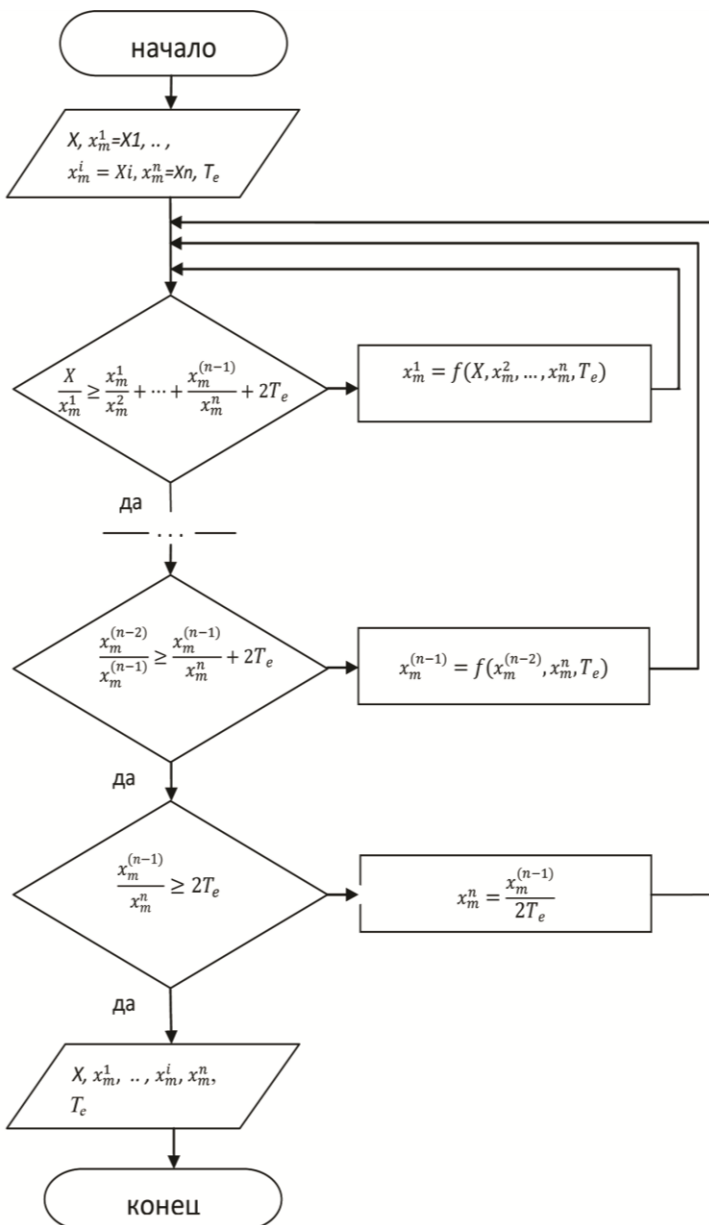


Рисунок 6 - Алгоритм расчета достижимых уровней ограничений в системе  $n$ -го порядка

Количество циклов вычислений минимизировано, но строго не фиксировано, алгоритм выполняется до момента выполнения всех  $n$  нестрогих неравенств (8) при фиксированных  $T_3$ , максимальном задании  $X$  с получением пакета достижимых значений координат. Так для НБМ 2-го порядка возможен лишь 1 цикл уточнений.

Это соответствует принципу формирования оптимальных процессов и характеристик управления: переключения должны выполняться при нулевых значениях 2-й и всех высших производных. Для каждой координаты характеристика переключений однозначна.

Подобный предварительный анализ перед началом процессов необходимо проводить при каждом задании  $x_g = X$  с определением достижимых значений координат  $x_m^i$ , устанавливаемых при старте.

**В четвертой главе** приведены результаты моделирования и натурных испытаний ЭМС с объектами, рассмотренными в

гл. 2, 3, подтверждающие возможность расширения области применения НБМ для многоконтурных быстродействующих систем.

#### Внутренняя часть системы – неколебательный объект.

Для исследуемой системы (гл. 3) на основе НБМ 2-го порядка, как наиболее критичной к величине параметрических ограничений, приняты два варианта внутренней линейной части: аperiodическое звено и неколебательный объект 3-го порядка. Для анализа переходных процессов результаты их моделирования сведены в табл. 1 для случаев умеренного ( $K4=200$ , максимальное задание 60) и высокого быстродействия ( $K4 = 1600$ , максимальное задание 200).

Таблица 1 - Оценка процессов в модели системы второго порядка

параметр \ тип	а) без уточнения внутренней части				б) с уточнением внутренней части			
$K4$	200	200	1600	1600	200	200	1600	1600
$x_z - x$ , % при $t_{расч}$	-1,56	-0,64	0,61	0,1	-1,68	-0,84	-0,09	0,08
$x_z$ ( $X1=9$ ; $X2=90$ )	100	200	2	60	100	200	2	60
$2T_3$ , с	0,01		0,00125		0,01		0,00125	
$x_{max}$ , % при $t_1$	100,98	100,53	101,03	100,11	100,17	100,09	100,07	100,18
$t_1$ , с при $x_{max}$	0,0537	0,0753	0,0063	0,0242	0,0549	0,0772	0,0064	0,0238
$t_{расч}$ , с	0,04222	0,06444	0,00565	0,02458	0,04222	0,06444	0,00565	0,02458
$t_n$ , с	0,04587	0,0674	0,00535	0,02317	0,0501	0,07232	0,00588	0,02303

Согласно табл.1 задания  $x_z = \frac{2}{x_g}$  (выход  $x = \frac{2}{x}(t)$ ) выбраны для существенно нелинейных процессов ( $x_z = 200$ ; 60) и значений, близких к границе линейной области ( $x_z = 100$ ; 2). При больших заданиях наблюдается приближение к оптимальному процессу в момент расчетного времени переходного процесса ( $t_{расч}$ ):  $\delta = 0,2\%$  при коэффициенте внутреннего контура  $K4 = 200$  и  $\delta = 0,02\%$  при  $K4 = 1600$ ; при заданиях, приближенных к линейной области:  $\delta = 0,12\%$  при  $K4=200$  и  $\delta = 0,52\%$  при  $K4 = 1600$ . При этих заданиях на процессы оказывает существенное влияние параметрическое ограничение в форме  $T_3$ , при этом доля параметров переходных функций более существенна. По отношению к расчётному время процесса отличается при больших заданиях на  $\varepsilon = \frac{t_n - t_{расч}}{t_{расч}} \cdot 100\% = 12,23\%$  при  $K4 = 200$  и  $\varepsilon = 6,3\%$  при  $K4 = 1600$ ; при небольших заданиях на  $\varepsilon = 18,66\%$  при  $K4 = 200$  и  $\varepsilon = 4,1\%$  при  $K4 = 1600$  по моменту первого совпадения с заданием ( $t_n$ ), и чем больше  $T_3$ , тем это различие существеннее. Кроме того, зафиксированы максимальное значение выходной величины  $x_{max}$ , а также момент времени  $t_1$ , когда  $x = x_{max}$ . На рис.7 представлен вид этих процессов.

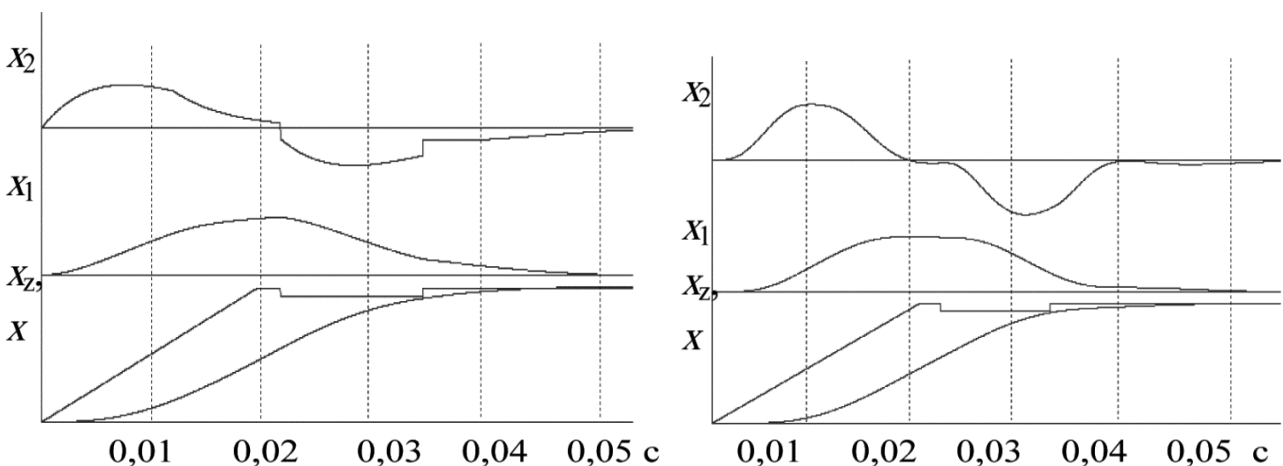


Рисунок 7 - Переходные процессы в нелинейной базовой модели:  
а - без уточнения внутренней части; б - с уточнением внутренней части – звено  $W_0(p)$

### Внутренняя часть системы - колебательный объект.

Для моделирования использованы данные привода пластометра. При этом параметры механизма приведены к валу двигателя.

Механизм приводится в движение от двигателя постоянного тока независимого возбуждения через клиноременную передачу с передаточным числом  $i=3,23$  и коэффициентом соотношения масс  $\gamma = 1,85$ . Управление двигателем двухконтурное с регуляторами ускорения  $PV$  ( $PT$  в составе  $PV$ ) и скорости  $PC$ . Замена клиноременной передачи на ременно-цепную приводит к изменению  $\gamma$ : 1)  $\gamma = 1,02$  (легкий привод) и 2)  $\gamma = 22$  (тяжелый привод), что также исследовано. Ниже приведены данные для  $\gamma = 1,85$  при клиноремённой передаче.

Номинальные данные двигателя: мощность 90 кВт,  $\omega_{\text{ном}} = 157$  рад/с,  $M_{\text{ном}} = 634$  Н·м,  $I_{\text{ном}} = 230$  А,  $U_{\text{ном}} = 440$  В, сопротивление якорной цепи  $R = 0,0312$  Ом, её индуктивность  $L = 0,004$  Гн, момент инерции  $J_1 = 2$  Н·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>. Ограничения:  $M_{\text{доп}} = 2,5M_{\text{ном}}$ ;  $(dI/dt)_{\text{доп}} = 40 I_{\text{ном}}/\text{с}$ . Реверсивный тиристорный преобразователь Simoreg 6RA70 с фильтром на его входе ( $T_\mu = 0,0016$  с). У механизма неприведенный момент инерции  $J_2 = 17,8$  Н·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, жесткость ременной передачи  $C = 2330$  Н·м.

Для моделирования системы (рис. 3, рис. 4) определены механическая постоянная двигателя  $T_{m1} = 0,495$  с и механизма  $T_{m2} = 0,422$  с, постоянные времени упругого звена  $T_c = 0,002$  с, колебаний  $T_y = 0,02$  с.

Демпфирование. Процессы (в линейной области), характеризующие демпфирование, приведены на рис. 8, а без контура скорости, что возможно при действии ограничения задания момента; на рис. 8, б – при работе двух контуров. Демпфирование: 1 – оптимальное одноконтурное по (1); 2 – по (4); 3 – по (6); 4 – то же, с ограничением  $dm/dt$  на уровне  $x_{2m} = 18$ . Параметры этих систем приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Параметры систем при демпфировании ( $m_c=1$ )

Параметр \ тип	Одноконтурная система			Двухконтурная система	
	опт. демф. (1)	по форм-м (4)	по форм-м (6)	по форм-м (4)	по форм-м (6)
$T_e, \text{с}$	0,011	0,007	0,0083	0,007	0,0083
$k_{py}$	50,521	58,343	39,03	58,343	39,03
$k_{pc}$	-	-	-	5,95	4,57

Эффективность демпфирования можно оценить, сравнивая процессы 2 - 4 с процессом 1 на рис. 8, который отличается наибольшим декрементом затухания. Процессы 2 (рис.8, б) имеют высокий декремент затухания колебаний, при этом следует учесть повышенную колебательность контура ускорения при отключении контура скорости (рис. 8, а, процесс 2).

Таким образом, для приведения качества процессов 2 к процессу 1 требуется оперативная перестройка регулятора ускорения. Наименьшее перерегулирование характерно для процессов 3, причём нет необходимости в перестройках в составе регуляторов. Процесс 4 отражает действие дополнительного ограничения  $dm/dt$  на колебания, но это происходит в нелинейной области и важно то, что их амплитуды не возрастают и время регулирования не увеличивается.

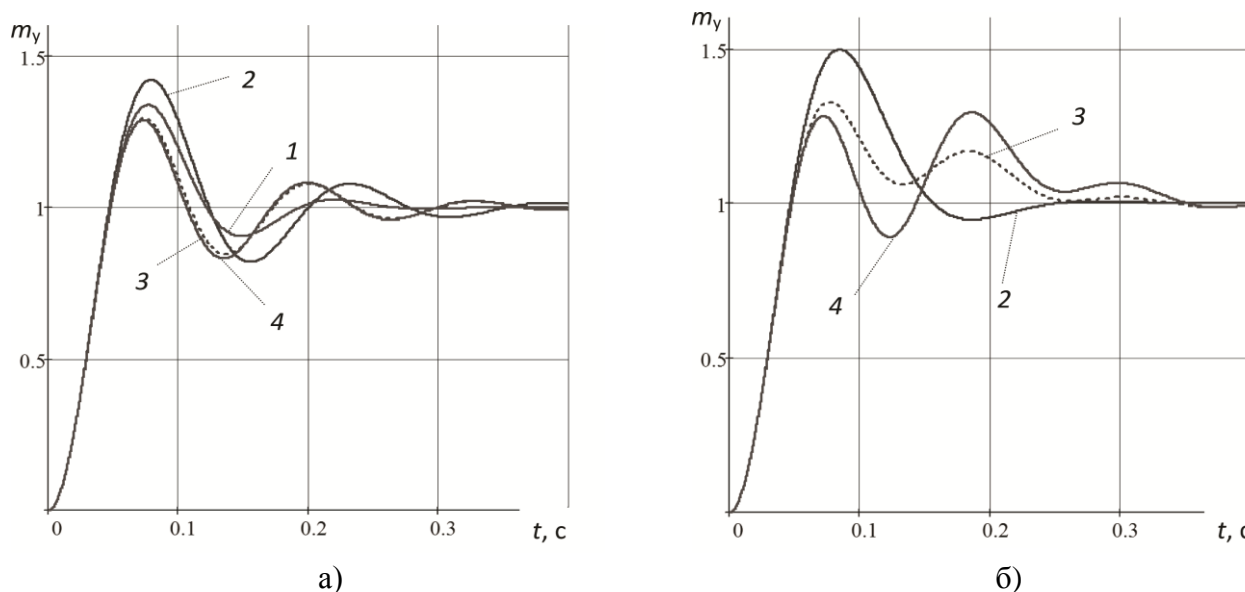


Рисунок 8 - Демпфирование при  $m_c=1$ : а) одноконтурное; б) двухконтурное

Управление. Режимы управления при учёте демпфирования исследованы при моделировании ЭМС пластометра, когда: а) использованы в линейной области параметры регуляторов по (6) и высшая производная  $dm/dt$  согласно расчётам не достигает предельного ограничения; б) в нелинейной системе при тех же параметрах по (6) введено ограничение  $dm/dt$ .

Результаты моделирования представлены на рис. 9 при задании  $\omega_3 = 1$  ( $m_c = 0$ ). Обозначены: 1, 2 – заданный и фактический момент двигателя; 3 – упругий момент; 4, 5 – заданная и фактическая скорость двигателя.

Подтверждено, что ограничение  $dm/dt$  допустимо во внешнем контуре линейной части нелинейной системы без изменения качества процессов в ней. Апробирован выбор уровня дополнительного ограничения на основе интегральной оценки процессов, исходя из условия формирования этих процессов за одно и то же время в замкнутой линейной подсистеме. Система в этом случае эквивалентна НБМ третьего порядка при одном перестраиваемом ограничении во внешнем контуре объекта.

Переходные процессы получены в результате моделирования системы пластометра при  $m_{доп} = 2,5$ ;  $(dl/dt)_{доп} = 40$  (в относительных единицах). После пересчёта к «единичным» интеграторам:  $X = 1$ ;  $X1 = 2,73$ ;  $X2 = 43,68$ . При оценке результатов (рис. 9) важно отметить подавление упругих колебаний; снижение перерегулирования момента относительно предельного уровня его задания, допустимое для электродвигателя не более чем на 5%; минимальное время процессов. В табл. 3 кроме параметров  $T_e$ ,  $k_{py}$ ,  $k_{pc}$  приведены расчетные время переходного процесса  $t_{po}$ , достижимые значения  $x_{1m}$ ;  $x_{2m}$ , а также фактические значения  $m$ ,  $dm/dt$ , время нарастания  $t_n$ , максимальное значение  $\omega_{max}$  в доли от  $\omega_3$  в момент времени  $t_1$ , фактическое время переходного процесса (при допустимой погрешности по  $\omega$ )  $t_{p(5\%)}$ ,  $t_{p(1\%)}$ .

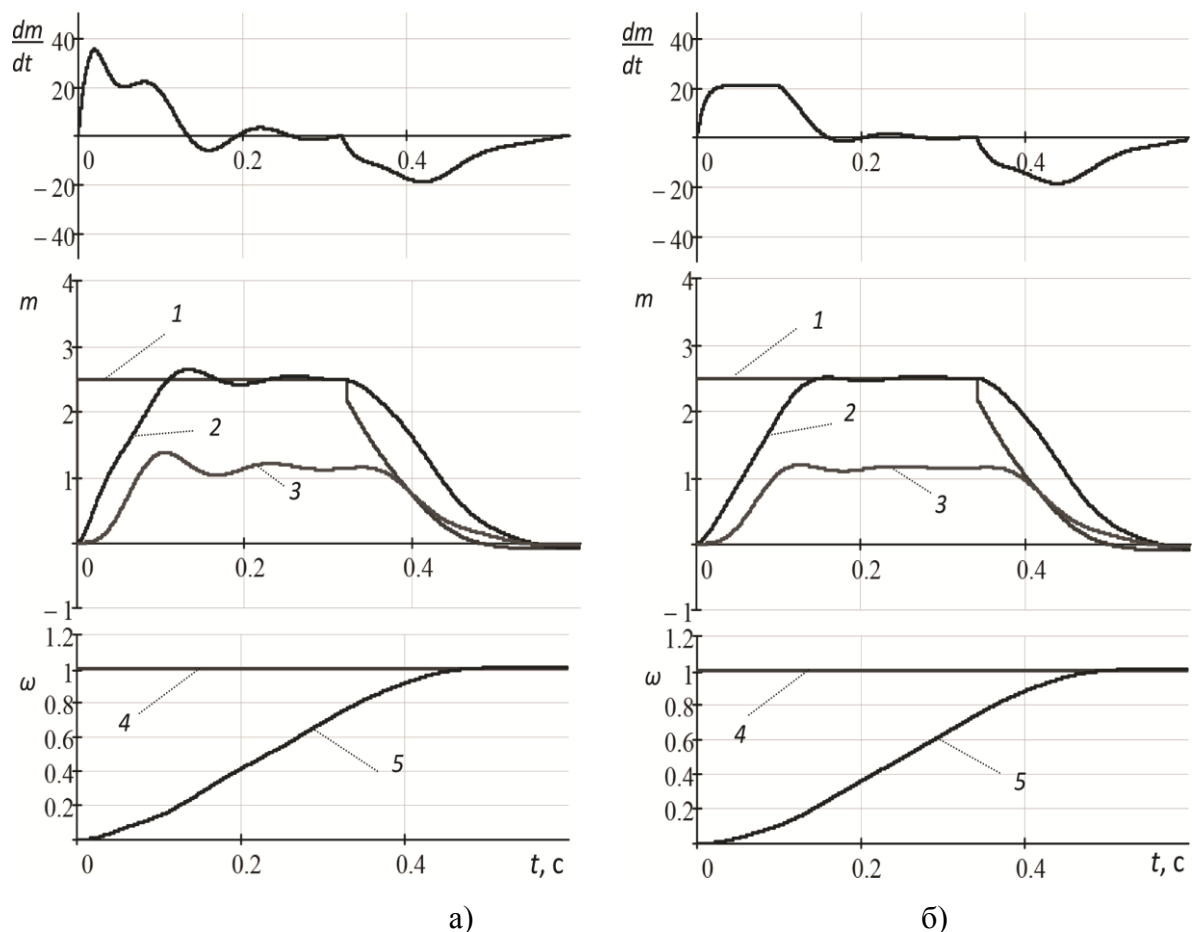


Рисунок 9 - Переходные процессы в двухконтурной системе

Анализ результатов моделирования пластометра показал, что настройка привода по формулам (6) по сравнению с (4) приводит к увеличению расчетного времени переходного процесса на 13%, но уменьшает величину превышения

Таблица 3 - Параметры и оценка систем при управлении

Параметр\тип	по формулам (4)		по формулам (6)	
	без огр-ния ( $dm/dt$ )	с огр-ем ( $dm/dt$ )	без огр-ния ( $dm/dt$ )	с огр-ем ( $dm/dt$ )
$T_e, c$	0,007		0,008	
$k_{py}$	58,343		39,03	
$k_{pc}$	5,95		4,57	
$T_{ec}, c$	0,0315		0,0474	
$t_{po}, c$	0,492		0,556	
$x_{1m}$	2,73		2,73	
$x_{2m}$	43,342		28,793	
$m$	2,89	2,6	2,65	2,52
$\sigma_m, \%$	15,6	4	6	0,8
$dm/dt$	39,12	22	35,11	21
$t_n, c$	0,453	0,471	0,478	0,498
$(\omega_{max}/\omega_s) \cdot 100$ при $t_1, \%$	100,72	101,08	100,17	101,17
$t_1, c$	0,485	0,504	0,478	0,573
$t_{p(5\%)}, c$	0,405	0,428	0,422	0,441
$t_{p(1\%)}, c$	0,439	0,518	0,588	0,606

допустимого момента  $m$  (6% против 15,6%). Введение дополнительного ограничения  $dm/dt$ , перестраиваемого на основе интегральной оценки, приводит к дальнейшему уменьшению перерегулирования  $m$ . При этом фактическое время переходного процесса не больше расчетного при отклонении скорости  $\omega$  на 2-5% от заданной в конце процесса. Ввод дополнительного ограничения благоприятно

сказываются на динамике привода при управлении: снижаются нагрузки на валу двигателя до уровня допустимых, формируются переходные процессы, близкие к физически оптимальным.

Апробация ввода обратной связи по ускорению и формирование нелинейной характеристики управления в регуляторе скорости с помощью перепрограммируемых функциональных блоков в преобразователе Simoreg 6RA70 показали возможность построения быстродействующих ЭМС с учетом параметрических и физических ограничений в объектах со сложной структурой.

**В заключении обобщены основные результаты работы.**

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. В рамках совершенствования нелинейных систем (НБМ) для различных вариантов сочетания физических (амплитудных) ограничений разработана методика определения достижимых физических ограничений с использованием алгоритма с целью формирования физически осуществимых процессов и определения объективной оценки времени оптимальных процессов.
2. Выполненный анализ устойчивой, многоконтурной линейной (неколебательной) внутренней части, относящейся к объекту, позволил обосновать ее аппроксимацию апериодическим звеном с определением в нем эквивалентной постоянной времени  $T_s$  с ее уточнением на основе интегральной оценки процессов.
3. Методика расчета нелинейных характеристик звеньев управления дополнена учетом свойств неколебательной линейной внутренней части, описываемой дифференциальным уравнением высокого (более второго) порядка, с целью достижения максимального быстродействия и повышения точности формирования управляющих воздействий.
4. Проведенный анализ колебаний в механизмах с упругими связями позволил аналитически определить контурные коэффициенты усиления скорости и ускорения «в малом» для эффективного демпфирования с определением границы линейной и нелинейной областей управления.
5. Методика расчета характеристик нелинейных звеньев управления дополнена учетом свойств колебательного объекта с определением расчётных пределов достижимого быстродействия и демпфирующих регуляторов.
6. Получено подтверждение результатов разработок на действующих электроприводах и моделированием процессов на ПЭВМ.

## **ПУБЛИКАЦИИ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Особенности анализа переходных процессов в оптимизированных по быстродействию нелинейных системах управления электроприводами // Электротехника, №7. 2006. С. 2-7.

2. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Параметрические ограничения в нелинейных системах управления механизмами с упругостью // Электротехника. 2010. №5. С. 9-13.
3. Потапов А.И., Мазунин В.П., Двойников Д.А., Коковихин Е.А. Методика исследований сопротивления деформации на пластометрическом комплексе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. №9. С. 59-63.
4. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Повышение быстродействия при управлении регулируемыми электроприводами механизмов с упругими связями // Электротехника. -2012.-№10. - С. 35-41.

**в прочих изданиях:**

5. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Проблематика оптимизации систем управления по быстродействию при учете ограничений // Механика и процессы управления моторно-трансмиссионных систем транспортных машин: Сборник кратких научных сообщений Всероссийской научно-технической конференции. Курган: Изд-во Курганского гос. Ун-та, 2003. С. 148-150.
6. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Автоматизированное оборудование для пластометрических испытаний металлов и сплавов // Научно-технический прогресс в металлургии (сборник научных трудов). Алматы: РИК по учебной и методической литературе, 2003. С. 312-323.
7. Мазунин В.П., Двойников Д.А., Шкатова А.В. Повышение быстродействия и экономичности управления электроприводами с ограничениями // Труды четырнадцатой научно-технической конференции “Электроприводы переменного тока”. г. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. С. 323-326.
8. Коковихин Е.А., Потапов А.И., Мазунин В.П., Двойников Д.А. Экспериментальное определение сопротивления деформации металлов и сплавов на автоматизированном пластометрическом комплексе // Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций: Тезисы докладов III Российской научно-технической конференции. Екатеринбург, 2007. 125 с.
9. Двойников Д.А., Мазунин В.П. Демпфирование упругих колебаний в системах управления электроприводами механизмов для пластической деформации металлов. Механика и процессы управления // Труды XXXVIII Уральского семинара. Том 2. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. С. 175-182.
10. Двойников Д.А., Коковихин Е.А., Мазунин В.П., Потапов А.И. Автоматизированный пластометрический комплекс для определения сопротивления деформации металлов и сплавов // 47-я Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», 1-5 июля 2008 года, Нижний Новгород: материалы конференции. Часть. 2. Нижний Новгород, 2008. С. 87-90.
11. Потапов А.И., Двойников Д.А., Мазунин В.П., Коковихин Е.А. Пластометр кулачкового типа. Методика и некоторые результаты исследований сопротивления деформации // Ресурс и диагностика материалов и кон-

- струкций. Тезисы IV Российской научно-технической конференции, г.Екатеринбург, 26-28 мая 2009. Екатеринбург, 2009. С. 23.
12. Двойников Д.А. Демпфирование колебаний в быстродействующих системах управления электроприводами с упругим звеном // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Часть 3. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. С. 254-256.
  13. Двойников Д.А., Мазунин В.П. Быстродействие нелинейных широкодиапазонных систем управления механизмами с упругостью // Динамика систем, механизмов и машин: матер. VII Междунар. Научн.-техн. конференции. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. С. 147-151.
  14. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Оптимизация по быстродействию управления нелинейными электромеханическими системами со сложными объектами // Тезисы 5-ой Российской научно-технической конференции. Екатеринбург, 2011. С. 111.
  15. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Особенности демпфирования колебаний в электроприводе при упругой связи в механизме // Электроприводы переменного тока: Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина", 2012. С. 105-108.
  16. Двойников Д.А., Мазунин В.П., Потапов А.И. Методика и опыт исследований деформации металлов осадкой на пластометре с автоматизированным регулируемым электроприводом. Тезисы докладов VII Российской конференции. г. Екатеринбург, 23-27 апреля 2012г. С. 110.
  17. Двойников Д.А., Зюзев А.М., Мазунин В.П. Моделирование быстродействующих систем управления электроприводами с упругостью в механизмах // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. Материалы 6-ой Международной научно-технической интернет-конференции. г. Пермь: ПНИПУ, 1-30 ноября 2012г. С. 251-259.